

новлені раніше на підставі мікробіологічних досліджень терміни зберігання ЕС – 72 години без консерванту та 90 діб з консервантом. За визначених термінів

зберігання розроблений емульсійний соус з використанням сухого молочно-білкового концентрату зі сколотин знаходиться в межах відмінної якості.

Література

1. Урюпина, Т. Л. Окружающая среда и продукты питания [Текст] / Т. Л. Урюпина, Б. К. Джурупова // Пищевая промышленность. – 2004. – № 7. – С. 82–83.
2. Гропянов, Д. А. Кулинарные соусы на основе эмульсионного полуфабриката многофункционального назначения [Текст] / Д. А. Гропянов, А. С. Ратушный, Т. В. Жубрева, А. П. Нечаев // Масложировая промышленность. – 2003. – № 2. – С. 34–35.
3. Табакаева, О. В. Функциональные эмульсионные продукты нового поколения [Текст] / О. В. Табакаева // Масложировая промышленность. – 2007. – № 3. – С. 17–19.
4. Горбатова, К. К. Химия и физика белков молока [Текст] / К. К. Горбатова. – М.: Колос, 1993. – 192 с.
5. Тепел, А. Химия и физика молока [Текст] / А. Тепел; пер. с нем. – СПб.: Профессия, 2012. – 824 с.
6. Дудина, З. А. Сывороточный белковый концентрат в производстве майонеза [Текст] / З. А. Дудина, И. А. Рузина, Н. А. Калашева, Е. С. Иванова // Пищевая промышленность. – 1991. – № 12. – С. 9–11.
7. Юдіна, Т. І. Технологія низькокалорійних емульсійних соусів з використанням молочно-білкового концентрату зі сколотин [Текст] / Т. І. Юдіна, С. М. Бесіда // Вісник СНУ імені Володимира Даля. – 2008. – № 2 (120) – С. 380–384.
8. ДСТУ 4487:2005 Майонези. Загальні технічні умови [Текст] / Вперше (зі скасуванням ГОСТ 30004.2-93) [Чинний від 2005-11-25]. – К.: Держпозживстандарт України, 2006. – 21 с.
9. Шмидт, А. А. Производство майонеза [Текст] / А. А. Шмидт, З. А. Дудина, И. Б. Чекмарева. – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 136 с.
10. Лисовская, Д. П. Тиксотропия майонеза [Текст] / Д. П. Лисовская, Е. Б. Суконкина, Л. А. Галун // Масложировая промышленность. – 2007. – № 5. – С. 20–24.

У статті розглянуто механізм процесу сушіння післяспиртової зернової барди на інертних тілах (фторопластова крихта) у псевдозрідженому шарі. На основі аналізу фізичної моделі процесу методом подібних перетворень системи диференціальних рівнянь, отримано узагальнююче (критеріальне) рівняння, яке дозволить описати процес сушіння продукту на інертних тілах у псевдозрідженому шарі

Ключові слова: дисперсний матеріал, сушіння, фторопластова крихта, псевдозріджений шар

В статье рассмотрен механизм процесса сушки послеспиртовой зерновой барды на инертных телах (фторопластовая крошка) в псевдооживленном слое. На основе анализа физической модели процесса методом подобных преобразований системы дифференциальных уравнений, получено обобщающее (критериальное) уравнение, которое позволит описать процесс сушки продукта на инертных телах в псевдооживленном слое

Ключевые слова: дисперсный материал, сушки, фторопластовая крошка, псевдооживленный слой

УДК 664.8.047:636.087.2

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.38056

РОЗРОБКА ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ПІСЛЯСПИРТОВОЇ БАРДИ НА ІНЕРТНИХ ТІЛАХ І ВИВІД КРИТЕРІАЛЬНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ

С. М. Сабадаш

Старший викладач*

E-mail: s.v.sabadash@ukr.net

Д. Д. Казаков

Старший викладач*

E-mail: d.d.kazak@ukr.net

О. Р. Якуба

Доктор технічних наук, професор*

E-mail: s.v.sabadash@ukr.net

*Кафедра інженерних технологій харчових виробництв
Сумський національний аграрний університет
вул. Кірова, 160, м. Суми, Україна, 40021

1. Вступ

Різноманіття матеріалів, що піддаються сушінню, значний різновид їх за природою, фізичними і

гігроскопічними властивостями зумовлюють необхідність класифікації об'єктів сушіння. Класифікація висушуваних матеріалів за визначальними характеристиками істотно спрощує задачу вибору раціональ-

ного способу сушіння і ефективного типу сушильного апарата [1–4].

В даний час проблемам підвищення ефективності технологічних процесів, обладнання та якості виробів приділяється велика увага. Стосовно до галузей виробництва, пов'язаних з термообробкою виробів, ці вимоги повинні знайти своє відображення в скороченні тривалості технологічних процесів, зниженні питомої витрати енергії, підвищенні якості готових продуктів.

Від правильності розрахунку процесу термообробки і науково обґрунтованого вибору його апаратурного оформлення безпосередньо залежать якість продуктів і витрати теплоти на його здійснення [5].

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Сушіння є одним із найважливіших етапів технологічного процесу виробництва багатьох харчових продуктів. Об'єктами сушіння виступають різноманітні дисперсні, шматкові, пастоподібні та рідкі продукти на різних стадіях їх переробки.

Сушильне обладнання застосовується в багатьох галузях харчової, м'ясо-молочної, рибної, борошномельної, плодово-ягідної, круп'яній, комбікормовій промисловості. Сушінню піддаються продукти, які різноманітні за своїми фізико-хімічними та структурно-механічними властивостями. Нині кількість висушених харчових продуктів стрімко збільшується. Такий значний асортимент продуктів зумовлює і широкую різноманітність сушарок, які використовують у виробництві [6].

У харчовій промисловості в основному застосовуються апарати, в яких продукти сушаться у щільному шарі. До них відносяться стрічкові конвеєрні сушарки, шахтні сушарки з коробами (для зерна), тунельні або камерні сушарки. Оскільки в щільному нерухомих шарі не вся поверхня часточок задіяна в теплообміні, процес сушіння перебігає повільно, можливі перегрів окремих ділянок шару. Тому сушарки із щільним шаром продукту, як правило, малопродуктивні, громіздкі й часто не забезпечують високої якості сушильного продукту.

У зв'язку з цим виникає необхідність розробки нових високо-інтенсивних методів сушіння і конструкцій сушильних установок. Перехід від щільного шару до перемішувального дозволяє значно підвищити інтенсивність тепло-і масообміну.

Останнім часом обробка дисперсних матеріалів у киплячому шарі [7] привертає увагу багатьох дослідників і знаходить широке застосування в різноманітних галузях промисловості. Саме цей метод для сушіння харчових продуктів дозволяє значно прискорити процес, що важливо не тільки для підвищення техніко-економічних показників сушильних установок, а й для покращення якості багатьох термолабільних продуктів, адже при тривалій термічній обробці якість їх може значно погіршуватися [8].

На сьогодні ринок України насичений багатьма видами сушеної продукції, більшість з якої (до 95 %) імпортується з-за кордону, причому в багатьох випадках сумнівної якості [9]. Це обумовлено тим, що традиційні способи сушіння рослинної сировини, які використовувалися ще за радянських часів, є дуже енергоєм-

ними, довготривалими та не дозволяють одержати однорідний за якістю продукт. Тому актуальним є пошук і дослідження нових, менш енергоємних способів сушіння, які дозволять отримати продукти високої якості [10]. Один із таких способів – це сушіння у псевдозрідженому шарі інертного носія [11].

3. Ціль та задачі дослідження

Проведені дослідження ставили за мету розробити механізм процесу сушіння післяспиртової барди на інертних тілах у псевдозрідженому шарі.

Для досягнення мети поставлено та вирішено наступні задачі:

- отримати узагальнене (критеріальне) рівняння, яке описує процес сушіння післяспиртової зернової барди на інертних тілах у псевдозрідженому шарі;
- експериментальним шляхом отримати явний вигляд рівняння теплообміну для процесу сушіння продукту.

4. Результати досліджень процесу сушіння післяспиртової барди на інертних тілах у псевдозрідженому шарі

Для отримання узагальненого (критеріального) рівняння було використано метод теорії подібності. Перетворивши систему рівнянь в безрозмірний вигляд отримаємо критерій подібності (узагальнені змінні), які характеризують даний процес.

Процес сушіння післяспиртової зернової барди в псевдозрідженому шарі може бути представлений, як процес конвективного теплообміну, який ускладнений перенесенням речовини. Одночасно з перенесенням енергії відбувається і перенесення речовини. Пар, який утворився в результаті перенесення тепла, потрапляє в оточуюче середовище в напрямку, перпендикулярному від поверхні матеріалу. Залежно від густини поперечного потоку речовини в процесі сушіння, тобто залежно від інтенсивності перенесення тепла, відбувається відповідна зміна в прилеглому ламінарному пограничному шарі. Пара, яка надходить із зони випаровування, порушує стан ламінарного підшару у поверхні тіла, турбулізує його, що призводить до різкого збільшення інтенсивності теплообміну [6]. В процесі сушіння післяспиртової барди на інертних тілах зростає густина поперечного потоку речовини внаслідок наявності контактного теплообміну між гарячими інертними тілами і вологим матеріалом. Експерименти показали, що для здійснення процесу сушіння на інертних тілах необхідно, щоб тільки частина загальної поверхні була покрита висушуваним матеріалом і, таким чином, залучалася до процесу сушіння. Друга частина загальної поверхні інертного тіла повинна бути вільною від вологого матеріалу і брати участь тільки в теплообміні. Ця вільна від вологого матеріалу частина поверхні інертних тіл нагрівається нестационарно до температури, вищої за температуру мокрого термометра ($t_n > t_m$). Нагріті інертні тіла, потрапляючи в зону подачі пастоподібної післяспиртової зернової барди, покриваються плівкою вологого матеріалу, який має температуру $t_0 < t_n$. У результаті контактного

теплообміну відбувається випаровування вологи в середині плівки. Пароутворення в середині плівки вологого матеріалу складає загальний градієнт тиску в плівці, який релаксується тільки при перенесенні разом із паром субмікроскопічних часток вологи із пор матеріалу в пограничний шар і в ядро турбулентного потоку, де вони й випаровуються.

Теорію об'ємного випаровування краплин у пограничному шарі, розроблену А. В. Ликовим, підтвердили шведські дослідники, яким вдалося сфотографувати процес випаровування краплини в пограничному шарі.

За цією теорією має місце молярне диспергування субмікроскопічних часток вологи в ламінарному пограничному шарі, яке викликано хвилеподібним рухом у поперечному шарі (ефект Папалексі). У випадку сушіння на інертних тілах у фонтануючому шарі головною рушійною силою молярного диспергування виступає надлишковий тиск у плівці матеріалу внаслідок контактного теплообміну. Поперечний потік речовини, який потрапив у вигляді пари із пор матеріалу у пограничний шар, частково конденсується в ньому, що призводить до різкого зменшення об'єму і порушення структури пограничного шару [12].

Порушення пограничного шару поперечним потоком речовини, викликаного градієнтом тиску в середині матеріалу і процесами конденсації пари, і випаровування часток у пограничному шарі, призводять до збільшення коефіцієнта теплообміну.

Густина поперечного потоку речовини в пограничному шарі (внаслідок молярного диспергування) може бути збільшена шляхом покращення теплофізичних властивостей інертних тіл. Рушійною силою молярного диспергування речовини в пограничному шарі виступає загальний градієнт тиску в плівці, яка в свою чергу є функцією переданої кількості теплоти або кількості випареної вологи при контактному теплообміні. Відомо, що для нестаціонарного теплообміну кількість переданого тепла визначається при однакових режимних параметрах процесу критеріями Fo і Bi . За однакового часу нагрівання й охолодження кількість переданого тепла визначається температуропровідністю і теплопровідністю інертних тіл. Таким чином, критерій, що враховує вплив молярного диспергування часток у пограничному шарі в рівнянні теплообміну для процесу сушіння на інертних тілах в фонтануючому шарі, є функцією теплофізичних властивостей інертних тіл.

Розглядаючи механізм, контактний теплообмін між пастоподібною післяспиртовою бардою і інертними тілами, слід зазначити, що контактний теплообмін може значно прискорити процес, оскільки він впливає на зовнішню обставину обтікання тіл у зв'язку з зміною структури ламінарного пограничного шару і на вирівнювання температурних полів всередині плівки.

Під час сушіння післяспиртової зернової барди на інертних тілах на обтікаємому сушильному агенті поверхні висихаючої плівки відбувається безперервна якісна зміна механічних властивостей плівки із зміною її вологовмісту. При сушінні пастоподібної післяспиртової зернової барди відбувається постійне зіткнення інертних тіл, яке призводить до безперервного руйнування поверхні сухої кірки щільно-крихкого матеріалу, утвореної під час процесу. В щільно-плас-

тичному стані стирання з поверхні інертних тіл не може бути значним, оскільки сили зчеплення окремих твердих часток між собою, що зумовлені наявністю водяних плівок між дотичними твердими частинками, які достатньо великі. Тому при зіткненні інертних тіл в такому стані відбувається пластична деформація плівки, але не її стирання. При переході матеріалу у щільно-крихкий стан, коли міцність каркаса із твердих часток визначається тільки силами зчеплення між твердими частинками при відсутності водяних плівок, стирання перетворюється на фактор, який лімітує швидкість процесу.

Зважаючи на наведене вище, щодо послідовності перетворення щільно-пластичного стану матеріалу у щільно-крихкий у процесі сушіння післяспиртової барди на інертних тілах, цей процес може бути розділений умовно на дві стадії:

- стадія, яка визначається кінетикою сушіння;
- стадія, яка визначається кінетикою стирання сухої крихкої плівки барди з поверхні інертних тіл.

Залежно від властивостей висушуваного матеріалу на інертних тілах та або інша стадія може бути лімітуючою і визначати перебіг процесу. Так коли лімітуючою стадією виступатиме кінетика стирання (велика механічна міцність плівки), то застосування цього методу технічно й економічно неприйнятне, оскільки тепловий коефіцієнт корисної дії сушарки буде зменшуватися внаслідок безперервного наростання плівки протягом деякого часу.

У випадку, якщо лімітуючою стадією процесу стане стадія сушіння (низька механічна міцність плівки до стирання) і перебіг процесу визначається швидкістю випаровування вологи з поверхні інертних тіл, процес можна розглядати як процес конвективного сушіння. Застосування такого методу сушіння післяспиртової барди технічно та економічно можливе. Таким чином, загальна кінетика процесу визначається, окрім кінетики сушіння, кінетикою стирання або швидкістю відновлення поверхні, що залежить від механічної міцності матеріалу до стирання.

Безперервне руйнування сухої крихкої плівки матеріалу на поверхні інертного тіла призводить до зниження дифузійного опору настільки, що процес практично перебігає тільки в першому періоді швидкості сушіння (випаровування з поверхні). Тому процес сушіння на інертних тілах післяспиртової барди може бути описаний системою диференціальних рівнянь для першого періоду сушіння у псевдозрідженому шарі та рівнянням, яке враховує кінетику стирання.

Виходячи з теорії об'ємного розширення, явище тепло, і масообміну описується системою диференціальних рівнянь, які відображають розподіл швидкості і температур з урахуванням випаровування вологи з поверхні у в'язкому ламінарному пограничному шарі [13]. Рівняння кількості руху має вигляд:

$$W_x \frac{dW_x}{dx} + W_y \frac{dW_y}{dy} = v \frac{d^2 W_x}{dy^2} + W_g \frac{dW_g}{dx}. \quad (1)$$

Рівняння суцільності має вигляд:

$$\frac{dW_x}{dx} + \frac{dW_y}{dy} = 0. \quad (2)$$

Рівняння перенесення енергії з допоміжним виразами об'ємного випаровування (негативне джерело теплоти) має вигляд:

$$C_{pp} \left(W_x \frac{dt}{dx} + W_y \frac{dt}{dy} \right) = \lambda \frac{d^2 t}{dy^2} - rM; \quad (3)$$

краєві умови:

$$\alpha \Delta t = -\lambda \frac{dt}{dy} \Big|_{y=0}. \quad (4)$$

Умови існування псевдозрідженого шару:

$$\frac{\pi}{6} (\rho_M - \rho_r) g d^3 = \psi (Re g) \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\rho_r W_g^2}{2}. \quad (5)$$

Складені диференціальні рівняння кінетики стирання щільно-крихкого матеріалу і визначення механічних і фізичних характеристик післяспиртової барди, є не лінійними функціями вологовмісту, які повинні враховуватися в критеріальному рівнянні, вирішення яких у вигляді їх складності неможливо. Виходячи із представленого про послідовність перетворення щільно-пластичного стану у щільно-крихке, необхідно ввести безрозмірний коефіцієнт, який буде враховувати ступінь відхилення дійсного процесу від процесу випаровування з поверхні у фонтануючому шарі:

$$C_n = \frac{\sum E}{\Delta u \cdot r} - 1, \quad (6)$$

де $\sum E = E_{\text{нагрівання}} + E_{\text{продування}}$; $E_{\text{нагрівання}}$ – витрати енергії на нагрівання повітря; $E_{\text{продування}}$ – витрати енергії на нагнітання повітря у фонтануючому шарі; Δu – кількість випареної води; r – теплота пароутворення.

Запропонований безрозмірний коефіцієнт G_n характеризує стирання кірки пастоподібного матеріалу на інертних тілах і процес випаровування з поверхні інертних тіл.

Перетворивши цю систему диференціальних рівнянь методом подібності і додавши безрозмірний комплекс (6) і геометричний симплекс $\frac{H_0}{d}$, отримаємо наступну критеріальну залежність ($Pr \approx \text{const}$ для повітря):

$$\phi \left(Nu, Ar, Re, Pr, Gu, \frac{H_0}{d}, G_n \right) = 0. \quad (7)$$

Константа рівняння і показники ступеня знаходяться експериментальним шляхом.

На першому етапі досліджень результати бралися із дослідження методом планування експериментів. Але закінчені ступені були визначені допоміжними або уточнені експериментами досліджень.

Відповідно до критеріального рівняння, одержано у Ленінградському технологічному інституті, після

визначення критеріїв подібності із диференціальних рівнянь процесу сушіння хімічних матеріалів у першому періоді була представлена наступна ступенева залежність.

$$Nu = c \cdot Cu^{n_1} \cdot Re^{n_2} \cdot Ar^{n_3} \left(\frac{H_0}{d} \right)^{n_4}. \quad (8)$$

Явність вигляду цього рівняння була представлена у результаті експериментальних досліджень процесу сушіння барди на інертних тілах у псевдозрідженому шарі.

Визначення показників ступенів критеріїв подібності та коефіцієнта c в рівнянні виконувалася графо-аналітично за методом одиничної різниці.

Коефіцієнт теплообміну, який характеризує інтенсивність процесу сушіння в першому періоді, визначається наступним співвідношенням:

$$\alpha = \frac{Q}{\Delta t_{cp} \cdot F}, \quad (9)$$

де Q – кількість тепла за год., яке витрачається на випаровування води; Δt_{cp} – середня логарифмічна різниця температур між повітрям і частинками; F – сумарна поверхня інертних тіл, яка знаходиться у фонтануючому шарі.

Зважаючи на те, що інертні тіла являють собою сфери однакового (еквівалентного) діаметра, визначення сумарної поверхні зводилося до визначення кількості кульок. Загальна поверхня визначалася як кількість частинок даної маси, помноженої на поверхню однієї частинки. Середня різниця температур, між температурою повітря на вході в камеру, на виході із неї і температурою висушування матеріалу, відповідній температурі мокрого термометра.

При розрахунку коефіцієнта теплообміну кількості тепла, яке витрачається на нагрівання суспензії до температури мокрого термометра, можна знехтувати через його незначний показник порівняно з кількістю тепла, яке витрачається на випаровування води.

В критерії Re підставлена замість швидкості обтікання частинки, яку важко визначити для фонтануючого шару, швидкість повітря на вході в камеру. Визначення інших величин, які входять в критеріальне рівняння (8), не є складним. Усі фізичні постійні повітря взяті для температури повітря на вході в сушарку, а теплоти випаровування бралися відповідно до температури мокрого термометра. Витрату повітря визначали при температурі виходу з відніманням 10°C , по досягненню вимірюючого приладу.

Перша серія дослідів слугувала визначенню функціональної залежності між критеріями Nu і Gu при постійності всіх інших критеріїв. Отримані залежності показані на рис. 1.

Показник ступеня визначали графо-аналітичним шляхом по способу натягнутої нитки, або як його ще часто називають способом вибраних крапок, $n_1=0,59$. Після цього одержимо:

$$Nu = Gu^{0,59} \phi_1 \left(C_n, Ar, Re, \frac{H_0}{d} \right). \quad (10)$$

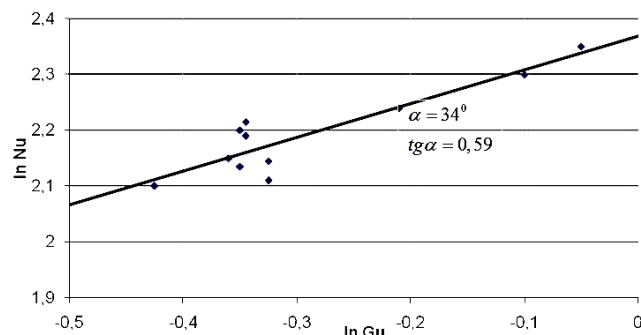


Рис. 1. Вплив критерію Гуфмана на інтенсивність теплообміну

Наступна серія дослідів була проведена при різних висотах щільних шарів інертних тіл з однаковою початковою вологістю $\omega=40\%$ за постійності інших факторів. Отримана залежність $\ln \frac{Nu}{Gu^{0.59}}$ від $\ln \left(\frac{H_0}{d} \right)$ зображена на рис. 2.

Кут нахилу по середніх показниках відповідає $\alpha=27,5^\circ$; $tg\alpha=-0,46$. Отримуємо:

$$Nu = Gu^{0.59} \cdot \left(\frac{H_0}{d} \right)^{-0.46} \cdot \phi_2(Cn \cdot Ar \cdot Re). \quad (11)$$

Третя серія дослідів була виконана з метою виявлення впливу критерію Re на швидкість процесу сушіння барди згрупований у комплекс параметром

$$\ln \frac{Nu}{Gu^{0.58} \left(\frac{H_0}{d} \right)^{-0.46}} \text{ дослідження пред-}$$

ставлені на рис. 3.

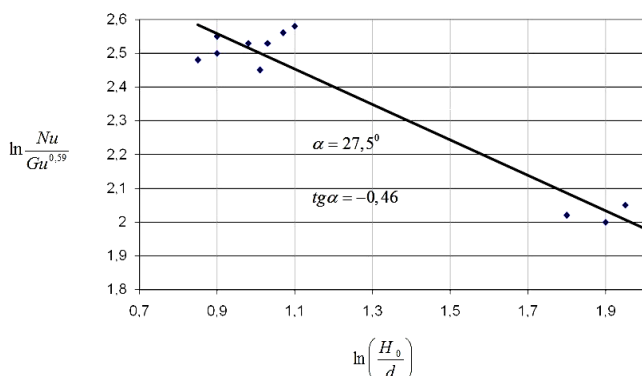


Рис. 2. Вплив симплексу на інтенсивність теплообміну

Кут нахилу прямих $\ln \frac{Nu}{Gu^{0.58} \left(\frac{H_0}{d} \right)^{-0.46}}$ становив $\alpha=45,5^\circ$,

$tg\alpha=1$; $n_2=1$. Тоді критеріальне рівняння має вигляд:

$$Nu = Gu^{0.59} \cdot \left(\frac{H_0}{d} \right)^{-0.46} \cdot Re^1. \quad (12)$$

Для встановлення впливу критерію Ar були проведені дослідів із сушіння барди в апаратах одного діаметра через зміну Ar від температури. Результати представлені на рис. 4.

Не зважаючи на обмежені можливості, була встановлена достовірна залежність у вигляді комплексу

$$\ln \frac{Nu}{Gu^{0.58} \left(\frac{H_0}{d} \right)^{-0.46}} \text{ від } \ln Ar \text{ у вигляді прямої з } \alpha=20^\circ, tg\alpha=-0,325; n_2=-0,325.$$

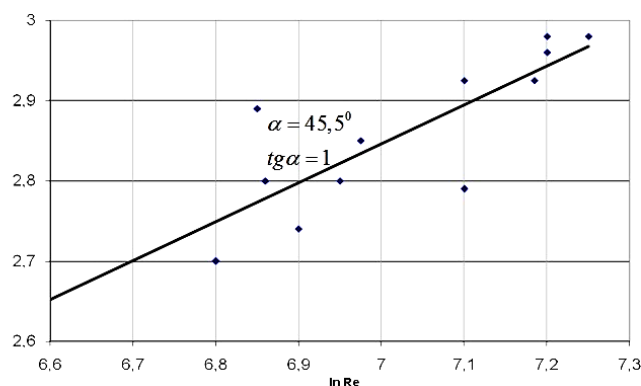


Рис. 3. Вплив критерію Рейнольдса на інтенсивність теплообміну

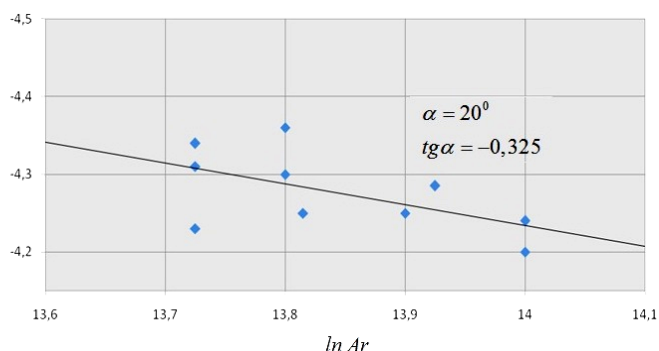


Рис. 4. Вплив критерію Ar на інтенсивність теплообміну

Безрозмірний коефіцієнт Cn визначається як середній із дослідів для сушіння барди. Було отримано середнє значення $Cn=1,27$. Кінцеве рівняння виявилось таким:

$$Nu = 1,27 Ar^{-0.325} \cdot Re^1 \cdot Gu^{0.59} \left(\frac{H_0}{d} \right)^{-0.46}. \quad (13)$$

Середнє відхилення розрахункових даних від дійсного критерію Нусельта (Nu) становить $\Delta=\pm 1,0\%$, максимальне відхилення $34,8\%$.

Межі зміни критерію в рівнянні (13) відповідають:

$$5,7 > Nu > 9,66;$$

$$1198590 > Ar > 933146;$$

$$1804 > Re > 947;$$

$$0,809 > \text{Gu} > 0,7;$$

$$8,85 > \frac{H_0}{d} > 2,415.$$

Значення вхідних величин визначалися по залежностях:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} \text{ – критерій Нусельта;}$$

$$\text{Ar} = \frac{g \cdot d^3 \cdot \rho_T}{\nu^2 \cdot \rho_T} \text{ – критерій Архімеда;}$$

$$\text{Gu} = \frac{T_c - T_m}{T_c} \text{ – критерій Гурмана;}$$

$$\frac{H_0}{d} \text{ – геометричний симплекс,}$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт/м}^2\text{К}$; λ – теплоємність повітря при температурі вологого термометра, Вт/мК ; D – діаметр вхідного отвору, м; ρ_T – густина інертних частинок, кг/м^3 ; $\rho_{\text{вх}}$ – густина повітря при температурі входу кг/м^3 ; ν – в'язкість повітря при температурі повітря; V – швидкість повітря у вхідному отворі; T_c , T_m – температура сухого вхідного повітря і температура вологого термометра; d – діаметр інертних частинок.

5. Обговорення результатів дослідження величин, які входять у загальне критеріальне рівняння

Щоб показати вплив окремих величин на інтенсивність процесу сушіння на інертних тілах у псевдозрізженому шарі, необхідно дати отримане критеріальне рівняння (13) у розгорнутому вигляді:

$$\alpha = 1,27 \cdot \frac{\lambda_T \cdot \rho_T}{\mu_T \cdot g} \cdot \left(\frac{T_c - T_m}{T_c} \right)^{0,59} \cdot \frac{\omega^2 \cdot d}{H_0 \cdot \rho_T}. \quad (14)$$

Із цього рівняння бачимо, що коефіцієнт теплообміну залежить в основному від величин, які можливо згрупувати у чотири комплекси:

- перший член першої частини рівняння характеризує механічні властивості матеріалу; він зворотно пропорційний коефіцієнту теплообміну;
- другий член характеризує фізичні властивості сушильного агента;
- третій виражає збільшення теплообміну при наявності масообміну;
- четвертий виражає гідродинамічну обставину і інтенсивність руху інертних тіл.

6. Висновки

На основі аналізу фізичної моделі процесу методом подібних перетворень системи диференціальних рівнянь, отримано узагальнене (критеріальне) рівняння, яке представляє собою процес сушіння післяспиртової зернової барди на інертних тілах у псевдозрізженому шарі з обліком подрібнення і стирання матеріалу з поверхні інертного тіла.

У результаті експериментального дослідження отримано явний вигляд рівняння теплообміну для процесу сушіння післяспиртової зернової барди, яке дозволяє оцінити оптимальні умови процесу сушіння продукту.

Рівняння може застосовуватись для розрахунку інших дисперсних продуктів на інертних тілах у псевдозрізженому шарі.

Література

1. Togrul, H. Suitable Drying Model for Infrared Drying of Carrot [Text] / H. Togrul // Journal of Food Engineering. – 2006. – Vol. 77, Issue 3. – P. 610–619. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.07.020
2. Abe, T. Thin Layer Infrared Radiation Drying of Rough Rice [Text] / T. Abe, T. M. Afzal // Journal of Agricultural Engineering Research. – 1997. – Vol. 67, Issue 4. – P. 289–297. doi: 10.1006/jaer.1997.0170
3. Doymaz, J. Convective Air Drying Characteristic of Thin Layer Carrots [Text] / J. Doymaz // Journal of Food Engineering. – 2004. – Vol. 61, Issue 3. – P. 359. doi: 10.1016/s0260-8774(03)00142-0
4. Hatamipour, M. S. Shrinkage of Carrots during Drying in an Inert Medium Fluidized Bed [Text] / M. S. Hatamipour, D. Mowla // Journal of Food Engineering. – 2003. – Vol. 55, Issue 3. – P. 247–252. doi: 10.1016/s0260-8774(02)00082-1
5. Губа, О. Е. Разработка рациональных способа конвективной сушки для жидких продуктов в диспергированном состоянии и конструкции для его осуществления [Текст] / О. Е. Губа, Ю. А. Максименко, С. А. Терешонков // Пищевая промышленность. – 2010. – № 10. – С. 24–28.
6. Анатазевич, В. И. Сушка пищевых продуктов [Текст]: справ. пос. / В. И. Анатазевич. – М.: ДеЛи, 2000. – 296 с.
7. Техника и технология пищевых производств [Текст]: тез. докл. VI междунар. науч.-техн. конф. / ред. А. Н. Поперечный. – Могилев, 2007. – 237 с.
8. Жолнер, І. Суша зернова барда [Текст] / І. Жолнер, В. Сосницький, С. Олійничук // Харчова і переробна промисловість. – 2004. – № 3. – С. 15–17.
9. Погожих, М. І. Технологія сушіння харчової сировини [Текст] / М. І. Погожих, В. О. Потапов, М. М. Цуркан. – ХДУХТ, 2008. – 229 с.
10. Дослідження процесу сушіння спиртової барди в псевдозрізженому шарі [Текст] / вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – Харків, 2009. – С. 192–196.